

**БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

УДК 621.793

ЧЕКУЛАЕВ
Андрей Васильевич

**ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ АНТИФРИКЦИОННЫХ
И КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ
ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ ГАЗОПЛАМЕННЫМ
РАСПЫЛЕНИЕМ ПОЛИМЕРНЫХ ШНУРОВ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.02.07 – Технология и оборудование
механической и физико-технической обработки

Минск, 2016

Работа выполнена в Государственном научном учреждении «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси»

**Научный
руководитель**

Белоцерковский Марат Артемович, доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией газотермических методов упрочнения деталей машин Государственного научного учреждения «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси»

**Официальные
оппоненты:**

Девойно Олег Георгиевич, доктор технических наук, профессор, заведующий научно-исследовательской инновационной лабораторией плазменных и лазерных технологий, филиала Белорусского национального технического университета «Научно-исследовательская часть»;

Бутовская Галина Васильевна, кандидат химических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории структурно-химического модифицирования полимеров Учреждения Белорусского государственного университета «Институт физико-химических проблем»

**Оппонирующая
организация**

Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии НАН Беларуси

Защита состоится «01» апреля 2016 г. в 14⁰⁰ часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.03 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, Минск, ул. Хмельницкого, 9, ауд. 419 б, тел. ученого секретаря 292-24-04.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан « » февраля 2016 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций,
доктор технических наук, профессор _____ О. Г. Девойно

© Чекулаев А.В., 2016

© Белорусский национальный
технический университет, 2016

ВВЕДЕНИЕ

Применение технологий формирования покрытий из термопластичных полимеров для защиты от коррозии и износа является одним из эффективных путей повышения долговечности деталей машин и элементов конструкций. Покрытия, формируемые дисперсными полимерами, успешно заменяют лакокрасочные, гальванические и получаемые гуммированием.

Наиболее экономичным и простым в реализации методом нанесения полимерных покрытий при ремонте ранее покрытых деталей или при защите элементов конструкций без разборки агрегатов на месте их эксплуатации является газопламенное напыление, позволяющее формировать и оплавливать слой в одной технологической операции. Оборудование для газопламенного напыления имеет малый вес и габариты, не требует источников электропитания, может эксплуатироваться в нестационарных условиях. Для напыления используются как специальные марки полимерных порошков, имеющие строго регламентированный химический и гранулометрический состав (стоимость более 10 \$/кг), так и полученные криогенным измельчением гранул полимеров отечественного производства. Однако газопламенные технологии, использующие полимерный порошок для нанесения покрытий, имеют следующие недостатки: при хранении и транспортировке порошки насыщаются влагой, слеживаются, образуют конгломераты; при сушке в сушильных шкафах порошки легкоплавких полиэфиров (например, вторичного полиэтилентерефталата) спекаются; невозможно обеспечить равномерное распределение в покрытии неорганических наполнителей (особенно наноразмерных), вводимых в напыляемую шихту.

Опыт газотермического напыления металлических покрытий свидетельствует о том, что указанных недостатков лишены шнуровые, проволочные или прутковые материалы. Отечественной промышленностью выпускаются полимерные шнуры в виде экструдатов, например, из полиамида), стоимостью не более 2 \$/кг, однако ни в Беларуси, ни в промышленно развитых странах мира нет технических средств для нанесения полимерных покрытий газопламенным распылением шнуров и экструдатов.

В связи с вышеизложенным разработка и исследование технологии нанесения полимерных покрытий газопламенным распылением термопластичных материалов в виде шнуров, прутков, экструдатов является актуальной задачей, а ее решение важно как для машиностроения, так и для других отраслей промышленности.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами, темами

Исследования по теме диссертации выполнялись в рамках следующих научно-технических программ и заданий: ГППИ «Новые компоненты в машиностроении», задание НКМ-6.2 «Разработать технологии изготовления износостойких элементов трибосопрежений приводных и исполнительных

механизмов мобильных машин и технологического оборудования с использованием модифицирования металлических и полимерных покрытий» (2004–2005 гг., № гос. рег. 20041341); БРФФИ тема № Т06Р-196 «Научные основы формирования высокопрочных и износостойких полимерных покрытий с наноструктурными наполнителями» (2006–2008 гг., № гос. регистрации 20064793); ГНТП «Новые материалы и технологии–2010», подпрограмма “Защита поверхностей” задание 1.67 «Разработать и внедрить высокоэффективные технологии формирования антифрикционных и защитных слоев на поверхностях шарнирных сопряжений и корпусных опор сухого трения сельскохозяйственной техники» (2008–2013 гг., № гос. регистрации 20082622).

Цель и задачи исследования

Цель исследования – разработка технологии нанесения антифрикционных и коррозионностойких покрытий высокоскоростным газопламенным распылением полимерных шнуров на детали трибосопряжений технологического оборудования, сельскохозяйственных и мобильных машин, и создание технических средств для ее реализации.

Для достижения поставленной цели потребовалось решение следующих задач:

- разработать физическую и математическую модели процесса формирования покрытий газопламенным напылением полимерными шнурами и определить значения теплофизических и динамических параметров распыляющей струи, исключающие деструкцию наносимого материала;
- выполнить расчет конструктивных параметров распылительной головки устройства для формирования покрытий из полимерных шнуров, разработать конструкцию устройства и изготовить экспериментальный образец;
- исследовать влияние режимов газопламенного напыления на свойства формируемых покрытий и определить диапазон оптимальных технологических параметров процесса;
- разработать и внедрить в производство технологический процесс формирования защитных и антифрикционных покрытий газопламенным распылением полимерных шнуров.

Научная новизна

1. На основе разработанной физической и математической моделей процесса диспергирования полимерного шнура в факеле термораспылителя, установлено соотношение между величинами теплофизических и динамических характеристик распыляющей полимерный шнур струи, реализация которого обеспечивает возможность формирования покрытий газопламенным распылением полимерных шнуров.

2. Экспериментально установлено, что предварительная термообработка полимерных шнуров влияет на процесс формирования и свойства покрытий, а именно предварительный отжиг шнура позволяет повысить производительность процесса напыления и прочностные характеристики покрытий.

3. Установлено влияние состава газовой смеси, образующей распыляющий факел, на физико-механические свойства и коррозионную стойкость покрытий, при этом увеличение содержания окислителя в распыляющем факеле приводит к повышению адгезии и снижению антифрикционных свойств.

4. Установлено, что модифицирование полимера ультрадисперсными частицами алмазо-графитовой смеси позволяет снизить коэффициент трения, повысить износостойкость, увеличить прочность сцепления покрытий при изменении характера разрушения в системе «покрытие – подложка», уменьшить влияние состава горючей смеси распыляющего факела на параметры качества покрытий.

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты теоретических исследований процесса газопламенного нагрева и распыления одной струей газа шнуров из термопластичных материалов, базирующиеся на анализе математической модели нагрева однородного сплошного полимерного цилиндрического тела при его осевом симметричном обтекании высокотемпературной струей газа, учитывающей значительное превышение внутримолекулярных связей расплава полимера над межмолекулярными, обуславливающее причину вытягивания расплава в нить, что позволило установить необходимые для диспергирования полимерного шнура величины скорости струи и плотности теплового потока.

2. Результаты экспериментальных исследований влияния конструкции камеры сгорания на энергетические параметры формируемых газопламенных струй, что позволило обосновать целесообразность использования камеры микрофакельного сжигания горючей смеси для достижения необходимых тепловых и динамических параметров распыляющей струи.

3. Установленные экспериментально закономерности изменения размеров надмолекулярных образований и объемного содержания кристаллической фазы в покрытиях от параметров предварительной термообработки шнуров и скорости охлаждения напыленного слоя, позволившие определить рациональные режимы формирования покрытий с повышенными механическими свойствами.

4. Результаты исследования влияния модифицирующего воздействия ультрадисперсного наполнителя на физико-механические характеристики напыленных покрытий, позволившие установить их положительное влияние на прочность сцепления формируемых покрытий, их износостойкость и коэффициент трения.

5. Результаты экспериментальных исследований, устанавливающих связь основных технологических параметров (соотношение горючих газов, дистанцию напыления, скорость охлаждения покрытий) процесса напыления с величиной адгезии покрытий, их триботехническими характеристиками и коррозионной стойкостью, позволившие с использованием метода математического планирования осуществить обоснованный выбор режимов и материалов

для разработки технологического процесса нанесения антифрикционных слоев на рабочие поверхности различных деталей.

Личный вклад соискателя

При выполнении диссертационной работы соискателем лично решены следующие задачи:

- разработана физическая модель процесса газопламенного распыления полимерных шнуров, реализация которой позволяет наносить покрытия, исключая деструкцию распыляемого материала;
- разработана математическая модель плавления однородного сплошного полимерного шнура при его осевом симметричном обтекании высокотемпературной струей газа;
- проведены экспериментальные исследования теплофизических и динамических параметров факела разработанного газопламенного термораспылителя;
- выполнены экспериментальные исследования по оценке влияния состава горючей смеси распыляющего факела, дистанции напыления и скорости охлаждения покрытия на свойства и структуру покрытий;
- проведена оптимизация результатов экспериментальных исследований влияния режимов напыления на функциональные свойства покрытий;
- разработан технологический процесс нанесения антифрикционных покрытий газопламенным распылением полимерных шнуров на рабочие поверхности сферических корпусных опор подшипниковых узлов почвообрабатывающих агрегатов.

Совместно с научным руководителем работы д.т.н. Белоцерковским М.А. выбрано научное направление и определены задачи исследования, разработан способ газопламенного распыления полимерных шнуров и устройство для его реализации, проведен комплекс исследований и внедрение результатов в производство. Прядко А.С., д.ф.-м.н. Кукареко В.А. оказывали консультативное и практическое содействие при изготовлении экспериментального образца термораспылителя, исследовании структуры, фазового состава и свойств покрытий.

Апробация результатов диссертации

Основные положения работы доложены и обсуждены на международных научно-технических конференциях: МНТК «Машиностроение и техносфера XXI века» (Севастополь, 2005 г.); VI МНТК «Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии» (Гродно, 2005 г.); 9 МНТК «Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки» (С.-Петербург, 2007 г.); 1-я МНТК «Наноструктурные материалы» («НАНО-2008») (Минск, 2008 г.); Int. Conf. «ММТ-2008» (Israel, 2008 г.); 8-й Международ. симпозиум «Сварка и родственные технологии» (Минск, 2008 г.); II Международ. науч.-практ. конф. «Инженерия поверхностного слоя деталей машин» (Минск, 2010 г.); МНТК «Инновации в машиностроении» (Минск, 2010 г.);

Белорусский промышленный форум – 2011 (Минск, 2011 г.); Междунар. науч.-техн. семинар «Композиционные материалы и защитные покрытия» (Минск, 2012 г.); Междунар. симп. «Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка» (Минск, 2013 г.).

Опубликование результатов диссертации

По результатам исследований опубликовано 26 научных работ, в том числе: 9 статей в изданиях, входящих в Перечень ВАК Республики Беларусь объемом 3,01 авторских листа, 1 статья в сборниках научных трудов; 11 статей в сборниках материалов конференций. По материалам исследования получены 5 патентов Республики Беларусь.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав с краткими выводами, заключения, списка использованных источников и приложений. Общий объем диссертации составляет 166 страниц, включая 97 страниц машинописного текста, 79 иллюстраций, 19 таблиц, 15 страниц библиографического списка (179 наименований, из них 26 публикаций соискателя), 8 страниц приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении и общей характеристике работы обоснована актуальность исследований, изложена краткая характеристика диссертационной работы, сформулированы ее тема и цель, показана связь с крупными научными программами, приведены положения, выносимые на защиту, охарактеризована значимость полученных результатов.

Первая глава посвящена анализу существующих методов нанесения покрытий из термопластичных полимерных материалов. Все методы классифицированы и рассмотрены в зависимости от механизма воздействия тепла на систему «покрытие – подложка». Показано, что методы, не требующие на любом из этапов объемного нагрева, являются наиболее универсальными и предпочтительными, так как исключают проблемы, обусловленные габаритами и теплоемкостью изделий.

Отмечено, что из методов, требующих наименьшего расхода энергии на нагрев, отличающихся простотой реализации и экономичностью, наибольшее распространение получило газопламенное напыление дисперсных полимеров. Анализ недостатков использования напыляемого материала в виде порошка и преимуществ газотермического напыления металлических покрытий с использованием шнуровых, проволочных или прутковых материалов определили преимущества и целесообразность разработки технологии напыления покрытий газопламенным распылением полимерных шнуров.

На основании проведенного анализа сформулированы цель и основные задачи диссертационной работы.

Во второй главе приведены физико-механические свойства термопластов, методики исследования покрытий, а также изложена технология изготовления шнура и свойства модифицирующего наполнителя.

Для нанесения покрытий антифрикционного назначения выбран полиамид ПА 6 (ОСТ 6-03-09-93), для формирования коррозионностойких покрытий выбраны полиэтилентерефталат марки ПЭТФ (ГОСТ Р 51695-2000) и полиэтилен низкого давления марки ПЭНД 277-03 (ГОСТ 16338-85). Для модифицирования покрытий использовалась ультрадисперсная алмазно-графитовая смесь (УДАГ по ТУ РБ 28619110.001-95) в количестве 0,2 вес. %, вводимая на стадии изготовления шнура.

Определение тепловой мощности газовых потоков проводили с помощью калориметрического зонда.

Скорость движения струи газов, истекающих из термораспылителя, исследовали с помощью прибора ИССО-1.

Подготовку поверхности перед напылением покрытий осуществляли струйно-абразивным методом дробью чугунной колотой с зернистостью № 8. Давление воздуха в магистрали дробеструйной установки составляло 0,5–0,6 МПа.

Адгезионную прочность полимерных покрытий исследовали с помощью штифтового метода оценки прочности сцепления на специальных образцах, состоящих из оправки и конусного штифта (диаметр основания 4 мм), фиксируемого в оправке. В экспериментах использовалась разрывная машина РМИ-250 с электромеханическим приводом. Определение внутренних напряжений в покрытиях осуществляли консольным методом (ГОСТ 13036-67).

Оценку коэффициента трения и интенсивности изнашивания покрытий в условиях трения без смазки проводили на трибометре МТВП-9М, работающем по схеме возвратно-поступательного перемещения исследуемого образца, оснащенного устройством для измерения коэффициента трения. Удельная нагрузка при испытаниях составляла 2–10 МПа, средняя скорость скольжения – 0,06 м/с. Контртело – закаленная сталь У8 (HV800).

Для измерения толщины полимерных покрытий использовали цифровой магнитный толщиномер МТЦ-2М. Оценку влияния режимов нанесения покрытий на их прочность при растяжении осуществляли по ГОСТ 14236-81. В качестве разрывной испытательной машины использовали установку РМИ-250 с электромеханическим приводом позволяющей нагружать образцы с силой до 2500 Н.

Для исследования фазового состава (степени кристалличности) покрытий при изменении режимов их формирования использовали рентгеноструктурный анализ (установка ДРОН-3, монохроматизированное CoK_α излучение). Химический состав покрытий и их микрофотографию оценивали с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-5610 LV с системой химического анализа EDX JED-2201. Метод ИК-спектроскопии применяли

при изучении изменений физико-химической структуры покрытий с использованием ИК-спектрометра NEXUS™ E.S.P.

Третья глава посвящена теоретическому анализу процесса распыления полимерных шнуров и разработке конструкции термораспылителя. Сформировано основное условие, позволяющее реализовать процесс газопламенного распыления термопластичных шнуров – плавление материала необходимо выполнять с непрерывным удалением образующегося на поверхности шнура слоя расплава. Одним из возможных вариантов реализации этого условия является осуществление процесса нагрева и распыления (диспергирования) одной струей газа (патент РБ 10711), обладающей энергией способной не только расплавлять полимер, но и формировать касательные напряжения на поверхности расплава, превышающие его вязкость. Учитывая предложенное условие, разработана следующая математическая модель процесса.

При подаче шнура в высокотемпературную струю газа за счет конвективного теплообмена и теплопроводности на поверхности шнура образуется слой расплава, увеличивающийся до тех пор, пока касательные напряжения, возникающие вследствие симметричного обтекания шнура струей газа, не превысят вязкость этого слоя. Полимерный расплав в условиях проявления вязкости начинает течь по направлению приложенных межфазных напряжений. Симметричное воздействие касательных напряжений и значительное превышение внутримолекулярных над межмолекулярными связями молекул расплава вызывает его вытягивание в нить. При достижении нитью предельного значения вытягивания, она механически разрывается и уносится струей. Формирование покрытия происходит из кусочков нитей путем их перехлестывания и сплавления макромолекул в местах контакта, в отличие от процесса распыления металлических проволок, где покрытие формируется образованными каплями.

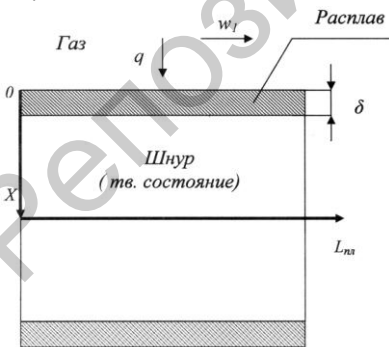


Рисунок 1. – Схема газопламенного распыления полимерного шнура

Таким образом, процесс газопламенного распыления полимерного шнура рассматривался как процесс симметричного продольного обтекания бесконечно длинного цилиндра высокотемпературным газовым потоком (рисунок 1). Причем вследствие низкой теплопроводности полимеров, считалось, что все тепло аккумулировалось в некотором «тонком» слое δ . С учетом особенностей термической деструкции термопластичных полимеров в матема-

тической модели задавалось условие, что образующийся на поверхности шнура слой расплава не должен нагреваться более чем 1,5 температуры плавления ($^{\circ}\text{C}$) полимера.

Установлено, что для исключения перегрева полимера, плотность теплового потока со стороны струи газа не должна превышать значений определяемых выражением

$$q = T_{\text{пл}} \lambda \sqrt{\frac{1}{6 a t}}, \quad (1)$$

где q – плотность теплового потока распыляющей струи газа, $\text{Вт}/\text{м}^2$; $T_{\text{пл}}$ – температура плавления полимерного, град; λ – теплопроводность полимера, $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{град}$; a – коэффициент температуропроводности полимера, $\text{м}^2/\text{с}$; t – время нагрева шнура, с.

Таким образом, ограничение тепловой мощности распыляющей струи газа обусловлено теплофизическими свойствами полимера и временем его нахождения в зоне плавления. Время в зоне плавления определяется скоростью перемещения расплава V которая определялась уравнениями одномерного движения тонкой пленки (длина волны превышает амплитуду волны). В частности уравнениями пограничного слоя Навье-Стокса:

$$\frac{\partial V_L}{\partial t} + V_L \frac{\partial V_L}{\partial L} + V_x \frac{\partial V_L}{\partial x} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial L} + \nu \frac{\partial^2 V_L}{\partial x^2} + F$$

где F – движущая сила (ось L направлена по направлению движения пленки (слоя), ось X – перпендикулярно поверхности пленки).

Движущая сила F , для рассматриваемого процесса, принималась как напряжение поверхностных сил (касательное напряжение сил трения $\tau_{\text{мф}}$).

Возникающее касательное напряжение на границе раздела фаз определялось как для турбулентного режима течения газа (число Рейнольдса $\text{Re} > 2 \cdot 10^3$) из выражения

$$\tau_{\text{мф}} = 0,03 \rho_1 w_1^{1,75} \left(\frac{\nu}{R_T} \right)^{0,25}$$

где ρ_1 – плотность струи газа, $\text{кг}/\text{м}^3$; w_1 – скорость распространения газового потока, $\text{м}/\text{с}$; ν – кинематическая вязкость газового потока $\text{м}^2/\text{с}$; R_T – радиус сопла термораспылителя, м.

Получена связь между теплофизическими и динамическими параметрами струи газа и скоростью подачи шнура в зависимости от его материала изготовления:

$$V_{\text{под}} = \frac{2qL_{\text{пл}}}{c\rho_2 \left(d - \frac{3q^2 a L_{\text{пл}} \mu}{w_1^{1.75} T^2 \lambda^2 \rho_1} \left(\frac{R_f}{v} \right)^{0.25} \right)}, \quad (2)$$

где μ – динамическая вязкость полимерного расплава, Па·с; $L_{\text{пл}}$ – длина зоны плавления шнура, м; c – удельная теплота плавления полимера, Дж/кг; ρ_2 – плотность полимерного расплава, кг/м³; d – диаметр шнура, м.

Использование зависимости (2) для случая распыления шнура диаметром 3 мм из полиамида ПА 6 позволило установить (рисунок 2) что процесс распыления необходимо осуществлять струей газа с определенной взаимосвязью теплофизических и динамических параметров.

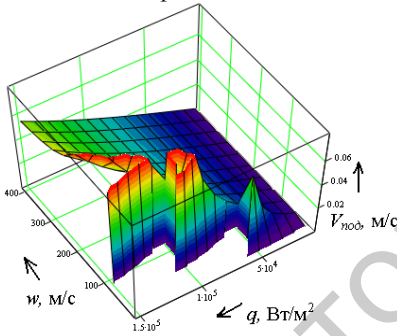


Рисунок 2. – Зависимость скорости подачи полиамидного ПА6 шнура диаметром 3 мм от мощности теплового потока и скорости струи

ся избытком динамической мощности струи газа, с повышением скорости струи без повышения тепловой мощности эффективность процесса распыления не увеличивается). Анализ полученных результатов показал, что для значений теплового потока распыляющей струи газа от $5 \cdot 10^4$ до $5 \cdot 10^6$ Вт/м² в качестве оценочных расчетов скорости струи газа можно применять выражение

$$w_1 \approx (0,8 - 1,3) \frac{q}{10^3}. \quad (3)$$

Расчетным путем установлено, что в зоне плавления шнура из полиамида ПА 6 струей газа с тепловой мощностью около 500 кВт/м² ее скорость должна составлять около 500 м/с (патент Республики Беларусь № 12620).

Показано, что для формирования струи с требуемыми характеристиками целесообразно использовать камеру сгорания, реализующую принцип

В зависимости от этих характеристик процесс распыления характеризуется тремя областями значений струи газа, а именно: (а) областью значений, при которых процесс распыления осуществлять невозможно (характеризуется перегревом полимерного слоя в зоне плавления шнура из-за низкой динамической мощности струи газа); (б) областью значений параметров струи газа, характеризующейся максимальными скоростями подачи шнура; (в) областью неэффективных значений параметров струи газа (характеризуется

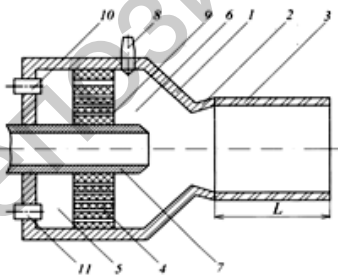
микрофакельного сжигания предварительно подготовленной горючей газообразной смеси.

На основании экспериментальных исследований разработан шнуровой полимерный термораспылитель с камерой микрофакельного сгорания газа, позволяющей формировать струю продуктов сгорания газа с плотностью теплового потока от 0,6 до 0,9 МВт/м² и скоростью распространения от 500 до 1200 м/с (таблица 1).

Таблица 1. – Технические характеристики шнурового термораспылителя

Характеристика термораспылителя	Значение
Вес, кг	2,4
Габаритные размеры, м	0,3х0,12х0,25
Расход и давление воздуха	25 м ³ /ч; 0,25 МПа
Расход и давление пропана	0,5 м ³ /ч; 0,2 МПа
Скорость подачи шнура, м/с	0,01–0,3
Диаметр распыляемых шнуров, мм	2–4
Привод подачи шнура	Электродвигатель ДПР 72-Ф1-01
Редукторы	Двухступенчатый цилиндрический и червячный

Для увеличения скорости подачи шнура (рисунок 3 а, б) со стороны наружного торца камеры сгорания предложено устанавливать цилиндрический патрубок (патент Республики Беларусь 2996), что позволяет формировать покрытие с производительностью не меньшей чем при газопламенном напылении полимерных порошков, а именно до 3 кг/ч.



а)



б)

Рисунок 3. – Схема камеры сгорания термораспылителя с распыляющим патрубком (а) и внешний вид термораспылителя (б)

На основании анализа результатов теоретических и экспериментальных исследований определено, что длина патрубку L с достаточной степенью точности описывается выражением

$$L = \frac{Zd}{a} \left(\frac{\lambda [T_{\text{пл}} - T_0]}{q} \right)^2, \quad (4)$$

где L – длина цилиндрического патрубку, м; Z – коэффициент, зависящий от состава полимера, с^{-1} ; $T_{\text{пл}}$ – температура плавления материал, К; T_0 – начальная температура материала, К. Величина коэффициента Z находится в пределах от 3,0 до 5,8 с^{-1} и зависит от химического состава полимера.

Четвертая глава посвящена исследованию влияния технологических режимов напыления на образующуюся структуру и свойства полимерных покрытий.

Выполнена проверка адекватности математической модели реальному процессу распыления шнуров путем экспериментального исследования толщины слоя расплава, текущего по поверхности шнура в зоне плавления, и сравнении полученных значений с расчетными данными. Установлено, что отличие между экспериментальными и расчетными значениями находится в пределах 8–20%. Анализ продуктов диспергирования шнуров показал, что они представляют собой крайне неоднородные по размеру и форме образования различных размеров в виде нитей, что полностью соответствует данным, полученным из рассмотрения предложенной физической модели процесса распыления полимерных шнуров.

Исследование влияния технологических параметров распыления шнуров из полиамида на структуру полимера в покрытии показали, что путем регулирования температурно-временными режимами охлаждения покрытия можно регулировать степень кристалличности. При увеличении скорости охлаждения покрытий объемное содержание кристаллической фазы существенно снижается, о чем свидетельствует уменьшение интенсивности дифракционных линий на дифрактограммах от кристаллического полиамида. Модификация полиамида добавками УДАГ, даже при медленном охлаждении покрытий, приводит к малому содержанию кристаллической фазы.

Исследование влияния состава горючей смеси, формирующей распыляющую струю, на изменения молекулярной структуры полимера в покрытии показали, что наибольшее совпадение числа полос характеристических колебаний атомных групп до и после распыления ПА 6 наблюдается при использовании смеси со стехиометрическим соотношением, на что указывает инфракрасный спектр полос поглощения атомных групп (рисунок 4). Число характеристических полос поглощения атомных групп и положение максимумов совпадает, изменяется лишь при некоторых волновых числах их интенсивность, что свидетельствует о сохранении физико-химических особенностей полимера в покрытии после его газотермического распыления.

Установлено, что в пределах значений давления в камере сгорания от 0,05 до 0,3 МПа при стехиометрическом составе пропано-воздушной смеси, изменение дистанции напыления от 30 до 200 мм позволяет формировать покрытия за один проход толщиной от 30 до 400 мкм (рисунок 5), причем мак-

симальные значения прочности сцепления покрытий обеспечиваются при напылении с дистанций 90–120 мм.

Показано, что влияние дистанции напыления на величину коэффициента использования материала ($K_{\text{ИМ}}$) зависит от величины давления газов в камере сгорания термораспылителя. Увеличение дистанции напыления при нижнем пределе давления (0,05 МПа) от 30 до 130 мм способствует повышению $K_{\text{ИМ}}$, от 65 до 77%, а при верхнем пределе давления (0,3 МПа) вызывает уменьшение этого показателя с 60 до 45%.

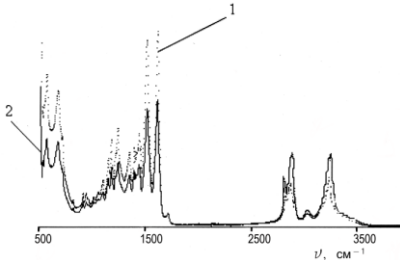


Рисунок 4. – Инфракрасный спектр полиамида ПА 6 в исходном состоянии (шнуре) (1) и в покрытии (2), нанесенном факелом при стехиометрическом соотношении пропана и воздуха ($\beta=25$)

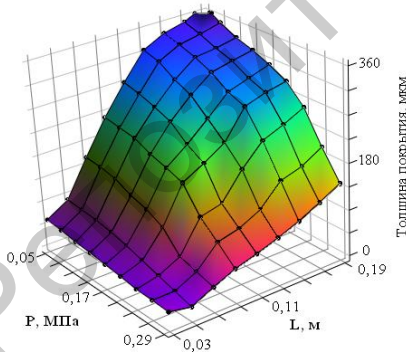


Рисунок 5. – Влияние дистанции напыления L и давления горячей смеси в камере сгорания P на толщину покрытий, напыляемых за один проходной основой до 4,1 МПа.

Экспериментально установлена зависимость прочности сцепления полимерных покрытий со стальной подложкой от соотношения окислителя и горючего газа в горючей смеси (коэффициент β), формирующей распыляющий факел. Показано, что повышение количества воздуха в смеси от $\beta = 20$ до $\beta = 30$ позволяет повысить адгезию покрытий из ПА 6 от 8,7 до 11,2 МПа. Максимальные значения адгезии (11,5 МПа) обеспечиваются при напылении нейтральным пламенем с небольшим избытком окислителя ($\beta = 26$). Показано, что добавка в полиамид ультрадисперсной алмазографитовой шихты УДАГ в количестве 0,2 мас.% увеличивает значения прочности сцепления формируемых покрытий до 13,2 МПа и снижает влияние на адгезию состава горючей смеси (рисунок 6).

Определено, что уменьшение скорости охлаждения полимерного покрытия из ПА 6 вызывает увеличение его прочности сцепления с подложкой, что обусловлено повышением степени кристалличности полимера. Повышение скорости охлаждения покрытий с 15 до 50 град/с снижает прочность сцепления со сталь-

Установлено, что соотношение окислителя и горючего газа в горючей смеси влияет на количество выделяющихся адсорбированных газов с подложки, являющихся концентратами внутренних напряжений на границе раздела «покрытие – подложка». Минимальная газонасыщенность покрытий наблюдается при использовании нейтрального факела пламени ($\beta = 24-26$). Отмечено, что независимо от состава горючей смеси для покрытий из ПА 6 наблюдается адгезионный тип разрушения, а для покрытий из полиамида, модифицированного УДАГ, характерен смешанный тип разрушения, представляющий собой разрушение частично по границе и частично в объеме полимера.

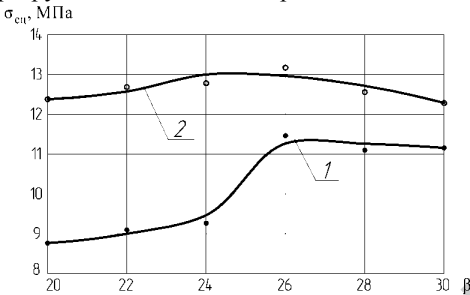


Рисунок 6. – Влияние состава горючей смеси на адгезию покрытий, напыленных шнурами из ПА 6 (1) и ПА 6 с 0,2 мас.% УДАГ (2)

графитовой шихты УДАГ в количестве 0,2 мас.% позволяет снизить коэффициент трения полиамида до 0,15–0,17 и повысить износостойкость в 3–5 раз.

Установлено, что независимо от состава агрессивной среды, коррозионная стойкость покрытий в большей степени зависит от скорости охлаждения, а не от соотношения газов в смеси, формирующей расплывающийся факел. Для покрытий из ПЭТФ увеличение скорости охлаждения от 5 до 50 град/с вызывает повышение стойкости более чем в 5 раз, а для покрытий из ПЭНД увеличение скорости охлаждения снижает стойкость в 2 раза. Сравнительная оценка стойкости порошковых и шнуровых покрытий в агрессивной среде по изменению адгезионных свойств в зависимости от времени выдержки в 10% растворе серной кислоты показала, что шнуровые покрытия обладают в 1,2–1,5 раза большей стойкостью, чем порошковые.

Пятая глава посвящена разработке технологии формирования полимерных покрытий и рекомендаций по ее практическому использованию.

На основании выполненных исследований по оценке влияния упорядоченности структуры полимера в шнуре на процесс его распыления установлено, что предварительный нагрев шнура до температуры 0,8–0,9 от температуры его плавления с последующей изотермической выдержкой в течение 4–5 часов приводит к значительному увеличению удельной массы (плотности) материала наносимого покрытия, обусловленному переходом макромолекул из

В ходе триботехнических испытаний установлено, что минимальный коэффициент сухого трения покрытий из ПА 6 составляет около 0,2 при удельных нагрузках 6–10 МПа, достигается

распылением шнуров восстановительным пламенем ($\beta = 20$) на дистанции 80–120 мм и обеспечивается при толщине покрытий 200–250 мкм и скорости их охлаждения 35–50 град/с. Добавка в шнур алмазо-

графитовой шихты УДАГ в количестве 0,2 мас.% позволяет снизить коэффициент трения полиамида до 0,15–0,17 и повысить износостойкость в 3–5 раз.

Установлено, что независимо от состава агрессивной среды, коррозионная стойкость покрытий в большей степени зависит от скорости охлаждения, а не от соотношения газов в смеси, формирующей расплывающийся факел.

Для покрытий из ПЭТФ увеличение скорости охлаждения от 5 до 50 град/с вызывает повышение стойкости более чем в 5 раз, а для покрытий из ПЭНД увеличение скорости охлаждения снижает стойкость в 2 раза. Сравнительная оценка стойкости порошковых и шнуровых покрытий в агрессивной среде по изменению адгезионных свойств в зависимости от времени выдержки в 10% растворе серной кислоты показала, что шнуровые покрытия обладают в 1,2–1,5 раза большей стойкостью, чем порошковые.

напряженного в более равновесное состояние. Анализ полученных результатов показывает, что чем выше плотность полимера в проволоке, тем выше скорость подачи проволоки и, следовательно, производительность процесса ее распыления, и тем больше когезионные свойства формируемых покрытий (рисунок 7). Разработан способ газопламенного напыления полимерных покрытий (патент Республики Беларусь № 13744).

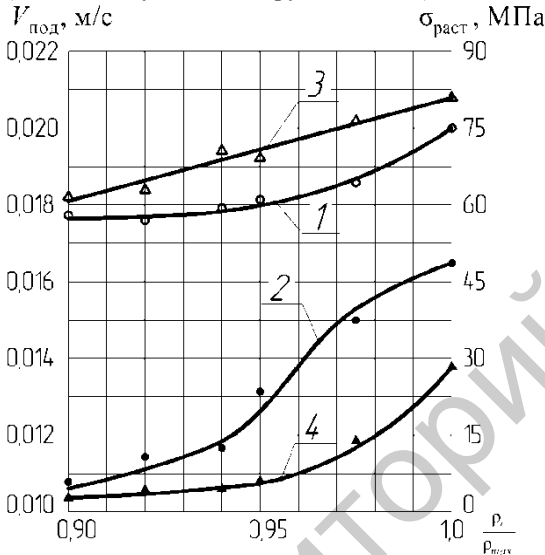


Рисунок 7. – Влияние относительной плотности ПА 6 (1, 3) и ПЭНД (2, 4) на скорость подачи шнура в термораспылитель (1, 2) и прочность покрытий при растяжении (3, 4)

$$G_{\text{сц}} = -11,163 + 0,911L + 1,398\beta + 0,072\psi - 0,039L^2 - 0,026\beta^2 - 0,003\psi^2. (5)$$

Используя уравнение (5) были построены графические зависимости прочности сцепления от дистанции напыления, скорости охлаждения, состава смеси (рисунок 8). Оптимизация процесса газопламенного напыления полимерными шнурами, проведенная с использованием статистического моделирования, позволила определить область значений технологических режимов напыления (дистанция напыления 0,09–0,14 м, скорость охлаждения не более 20–25 град/с, соотношение газов $\beta = 25$), обеспечивающих максимально возможную прочность сцепления покрытий со стальной основой (13–14 МПа).

Разработан технологический процесс нанесения антифрикционных покрытий газопламенным распылением шнуров, изготовленных из термопластичных полимеров (ТД ИЯМБ 01271.0029.000). Проведена сравнительная оценка работоспособности агрегатов комбинированных широкозахватных

Для обоснованного выбора технологических режимов напыления, обеспечивающих максимальную величину прочности сцепления покрытия и материала основы $G_{\text{сц}}$, а также сокращения продолжительности и объема испытаний были использованы методы математического планирования эксперимента. Варьируемые факторы: L – дистанция напыления; β – соотношение газов в смеси; ψ – скорость охлаждения. В результате получено следующее уравнение регрессии:

(АКШ), использующих корпусные опоры с покрытиями и без покрытий на их трущихся поверхностях. Установлено, что нанесение антифрикционных покрытий на трущиеся поверхности корпусных опор катков АКШ позволяет увеличить их работоспособность на 45–50 %, а также улучшить качество обработки почвы (увеличение крошения почвы на 4 %, уменьшение гребистости поля на 20%) и повысить показатели надежности АКШ в целом (увеличение на 10 % время наработки на отказ, уменьшение трудоемкости технического обслуживания на 20%). Технологический процесс формирования покрытий газопламенным распылением полимерных шнуров внедрен на ОАО «Гидросельмаш», что подтверждено актом о внедрении и расчетом полученного экономического эффекта в сумме 243, 58 млн. руб./год.

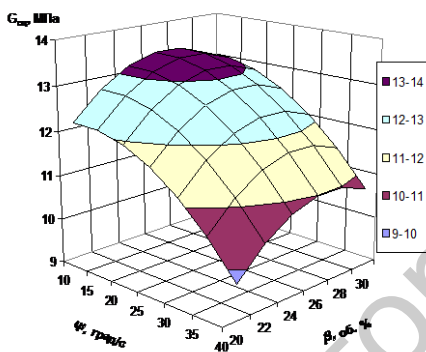


Рисунок 8. – Зависимость прочности сцепления $G_{сш}$ от скорости охлаждения ψ и состава смеси β ($L=11\text{см}$)

около 10% все площади покраски.

Разработаны технологические рекомендации по нанесению защитных коррозионностойких покрытий напылением полимерных шнуров из ПЭТФ на элементы конструкций сельскохозяйственной техники. Проведенные испытания разбрасывателей удобрений МТТ-4У, РУ-7000, МТТ-9 с защищенными участками поверхностей рам в течение двух периодов предпосевных работ показали отсутствие следов коррозии. У рам, обработанных по традиционной технологии (покраска эмалью), разрушилось

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. В результате теоретических исследований сформулировано основное условие, позволяющее реализовать процесс газопламенного напыления покрытий шнурами из термопластичных полимеров, заключающееся в том, что плавление материала необходимо выполнять с непрерывным удалением образующегося на поверхности шнура слоя расплава одной струей газа. На базе выполненного математического моделирования процесса образования на поверхности шнура слоя расплава и его течения в зоне контакта с горячей струей установлено, что для значений тепловых потоков от $5 \cdot 10^5$ до $5 \cdot 10^6$ Вт/м² отношение теплового потока распыляющей струи газа к скорости ее движения в зоне плавления шнура должно составлять $(0,8-1,3) \cdot 10^3$ Вт·с/м³, а скорость струи газа с тепловой мощностью около 500 кВт/м² в указанной зоне при напылении полиамида ПА 6 должна составлять около 500 м/с [1, 11, 15, 23, 24].

2. На основании анализа влияния параметров конструкции камеры сгорания термораспылителей на энергетические параметры образующихся газопламенных струй установлено, что для формирования в зоне плавления шнура струи газа с необходимыми тепловыми и динамическими характеристиками целесообразно использовать камеру сгорания реализующую принцип микрофакельного сжигания горючей смеси. Это позволило обосновать конструктивные параметры, разработать и изготовить термораспылитель, формирующий в зоне плавления распыляемого шнура газопламенный факел с плотностью теплового потока от 0,2 до 1,0 МВт/м² и скоростью распространения от 500 до 1400 м/с, который обеспечивает производительность распыления шнуров диаметром 3 мм из полиамида ПА6 и полиэтилентерефталата 1,9–2,0 кг/ч [17, 22, 25].

3. В ходе изучения влияния технологических режимов процесса на структурные параметры покрытий и особенности его формирования определен нижний предел скоростей охлаждения покрытий (для полиамида ПА 6 составляет 20 град/с) начиная с которого скорость охлаждения оказывает существенное влияние на количество кристаллической фазы и размер надмолекулярных образований. Установлено влияние соотношения окислителя и горючего газа в смеси, образующей распыляющий факел, на газонасыщенность покрытий, прочность сцепления со стальной подложкой, размер надмолекулярных образований и изменение химических связей полимера в покрытии. Показано, что повышение количества воздуха в смеси от $\beta = 20$ до $\beta = 30$ позволяет повысить адгезию покрытий из полиамида ПА 6 от 8,7 до 11,2 МПа. Установлено, что влияние дистанции напыления на величину коэффициента использования материала ($K_{\text{им}}$) зависит от величины давления газов в камере сгорания термораспылителя в пределах от 0,05 до 0,3 МПа [3, 5, 6, 7, 12, 13, 16, 25].

4. В результате экспериментальных исследований характера изменения триботехнических свойств наносимых покрытий от состава горючей смеси, дистанции напыления и скорости охлаждения установлено, что минимальный коэффициент сухого трения покрытий из полиамида при удельных нагрузках 6–10 МПа составляет около 0,2, достигается распылением шнуров восстановительным пламенем ($\beta = 20$) на дистанции 80–120 мм, обеспечивается при толщине покрытий 200–250 мкм и скорости их охлаждения 35–50 град/с. Показано, что добавка в шнур алмазо-графитовой шихты УДАГ в количестве 0,2 мас.% позволяет снизить коэффициент трения полиамида до 0,15–0,17 и повысить износостойкость в 3–5 раз [5, 6, 8, 14].

5. При экспериментальном исследовании влияния технологических параметров процесса на коррозионную стойкость напыленных покрытий установлено, что не зависимо от состава агрессивной среды, коррозионная стойкость в большей степени зависит от скорости охлаждения, а не от соотношения газов в смеси, формирующей распыляющий факел. Для покрытий из ПЭТФ увеличение скорости охлаждения от 5 до 50 град/с вызывает повыше-

ние стойкости более чем в 5 раз, а для покрытий из ПЭНД увеличение скорости охлаждения снижает стойкость в 2 раза. Сравнительная оценка стойкости порошковых и шнуровых покрытий в агрессивной среде по изменению адгезионных свойств в зависимости от времени выдержки в 10% растворе серной кислоты показала, что шнуровые покрытия обладают в 1,2–1,5 раза большей стойкостью, чем порошковые [3, 9, 20].

6. На основании выполненных исследований по оценке влияния упорядоченности структуры полимера в шнуре на процесс его распыления установлено, что предварительный нагрев шнура до температуры 0,8–0,9 от температуры его плавления с последующей изотермической выдержкой в течение 4–5 часов позволяет в зависимости от типа полимера повысить в 1,2–4 раза когезионные свойства покрытий и на 25–30% производительность процесса [2, 20, 26].

Рекомендации по практическому использованию результатов

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований предложен процесс газопламенного напыления полимерными шнурами, оптимизация которого с использованием статистического моделирования позволила определить область значений технологических режимов напыления (дистанция напыления 0,09–0,14 м, скорость охлаждения не более 20–25 град/с, соотношение газов $\beta = 25$), обеспечивающих максимально возможную прочность сцепления покрытий со стальной основой (13–14 МПа) [8, 19, 21, 23, 24, 26].

Разработан технологический процесс ТД ИЯМБ 01271.0029.000 нанесения антифрикционных покрытий на рабочие поверхности сферических корпусных опор почвообрабатывающих комбинированных широкозахватных агрегатов типа АКШ газопламенным напылением полимерных шнуров. Полевые испытаниями установлено, что нанесение антифрикционного покрытия позволило на 10 % увеличить время наработки агрегатов на отказ и повысить ресурс корпусных опор на 45–50 %. Разработанный технологический процесс формирования покрытий газопламенным распылением полимерных шнуров внедрен на ОАО «Гидросельмаш» с годовым экономическим эффектом 243, 58 млн. рублей [2, 4, 10, 18].

Разработаны технологические рекомендации по нанесению защитных коррозионностойких покрытий напылением полимерных шнуров из полиэтилентерефталата на элементы конструкций сельскохозяйственной техники для внесения минеральных и органических удобрений [2, 20].

Определены направления перспективного использования результатов исследований, включающие применение технологических процессов формирования ГПН-покрытий из полимерных шнуров с наноразмерными наполнителями в узлах сухого трения мобильной техники и технологического оборудования, а также использование разработанных технических средств для защиты от коррозии технологических емкостей (ванн) химической и электрохими-

ческой обработки, закладных деталей строительно-монтажных конструкций, элементов трубопроводного транспорта, эксплуатирующегося в жестких атмосферных условиях [3, 7].

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК

1. Белоцерковский, М. А. Исследование возможности нанесения композиционных полимерных покрытий термораспылением экструдатов / М. А. Белоцерковский, А. В. Чекулаев // Вестник Полоцкого государственного университета. Прикладные науки. – 2005. – № 6. – С. 79–83.
2. Белоцерковский, М. А. Технологические параметры газопламенного напыления покрытий термопластичными полимерами / М. А. Белоцерковский, А. В. Чекулаев, В. А. Кукареко // Механика машин, механизмов и материалов. – 2009. – № 3. – С. 69–74.
3. Белоцерковский, М. А. Нанесение покрытий высокоскоростным газопламенным распылением полимерных шнуров / М. А. Белоцерковский, А. В. Чекулаев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2009. – № 8. – С. 16–22.
4. Белоцерковский, М. А. Повышение долговечности узлов трения скольжения сельскохозяйственных машин газопламенным напылением полимерных покрытий / М. А. Белоцерковский, А. В. Чекулаев, А. И. Камко // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2010. – № 12. – С. 2–7.
5. Белоцерковский, М. А. Строение и свойства полимерных покрытий, полученных распылением экструдатов / М. А. Белоцерковский, А. В. Чекулаев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. – № 6. – С. 23–28.
6. Белоцерковский, М. А. Влияние режимов газопламенного напыления полимерными шнурами на свойства формируемых покрытий / М. А. Белоцерковский, А. В. Чекулаев // Вестник Полоцкого государственного университета, Серия В. Промышленность. Прикладные науки. 2014. – № 11. – С. 91–96.
7. Свойства газопламенных полимерных покрытий, нанесенных с использованием различных горючих смесей / М. А. Белоцерковский, А. В. Чекулаев, В. К. Шелег, И. В. Макаревич // Механика машин, механизмов и материалов. – 2015. – № 1 – С. 25–29.

Статьи, опубликованные в рецензируемых сборниках, включенных в перечень ВАК

8. Белоцерковский, М. А. Исследование процесса нанесения защитных покрытий, получаемых газотермическим распылением полимерных экструдатов / М. А. Белоцерковский, А. В. Чекулаев // Сварка и родственные технологии: респ. межвед. сб. науч. тр. – Минск : БГНПК ПМ, 2005. – № 7. – С. 77–80.
9. Белоцерковский, М. А. Использование технологии газопламенного напыления покрытий модифицированным полиамидом при изготовлении корпусных опор почвообрабатывающих агрегатов / М. А. Белоцерковский, А. В. Чекулаев //

Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – Кіровоград : КДТУ, 2009. – Вип. 39. – С. 111–114.

Статьи в других изданиях

10. Белоцерковский, М. А. Газопламенное напыление антифрикционных полимерных покрытий / М. А. Белоцерковский, А. В. Чекулаев // Промышленная окраска. – 2009. – № 6. – С. 34–40.

Материалы конференций

11. Белоцерковский, М. А. Анализ процесса нанесения покрытий газопламенным распылением полимерных проволок / М. А. Белоцерковский, А. В. Чекулаев // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф., Севастополь, 9–13 сент. 2005 г. : в 2 т. / ДонНТУ. – Донецк, 2005. – Т. 1. – С. 56–60.

12. Белоцерковский, М. А. Оптимизация параметров факела для термораспыления полимерных экструдатов / М. А. Белоцерковский, А. В. Чекулаев // Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии: материалы VI Междунар. науч.-техн. конф., Гродно, 1–2 нояб. 2005 г. : в 2 ч. / Гродненский гос. ун-т ; редкол.: А.И. Свириденко [и др.]. – Гродно, 2006. – Ч. 2. – С. 209–214.

13. Белоцерковский, М. А. Газопламенные полимерные покрытия / М. А. Белоцерковский, А. В. Чекулаев, Ю. С. Коробов // Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки : материалы 9 Междунар. науч.-техн. конф., СПб., 10–13 апр. 2007 г. – СПб., 2007. – С. 26–33.

14. Газопламенное формирование покрытий из полимерных материалов, модифицированных наноразмерными наполнителями / П.А. Витязь, А. В. Чекулаев, М. А. Белоцерковский, В. И. Жорник, С. В. Панин // Наноструктурные материалы (НАНО-2008) : материалы Первой Междунар. науч. конф., Минск, 22–25 апр. 2008 г. / редкол.: П. А. Витязь [и др.]. – Минск, 2008. – С. 306–307.

15. Korobov, Yu. Modeling of Flame Spraying of Polymer Wire with Nanofillers / Yu. Korobov, M. Belotzercovski, A. Chekulaev // Mathematical modeling and computer simulation of material technologies / Int. Conf. MMT–2008, Israel, 08–12 sept. 2008. – Israel, 2008. – P. 2.65–2.71.

16. Белоцерковский, М. А. Вопросы процесса газопламенного распыления полимерных экструдатов / М. А. Белоцерковский, А. В. Чекулаев // Сварка и родственные технологии : материалы докл. 8-го Междунар. симпозиума, Минск, 26 марта 2008 г. / ГНПО ПМ; редкол.: А.Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск, 2008. – С. 104–108.

17. Белоцерковский, М. А. Повышение производительности нанесения полимерных покрытий, получаемых высокоскоростным распылением проволок / М. А. Белоцерковский, А. В. Чекулаев // Инженерия поверхностного слоя деталей машин : сб. материалов II Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 27–28 мая 2010 г. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2010. – С. 94–95.

18. Белоцерковский, М. А. Разработка технологий формирования антифрикционных покрытий на элементах опор скольжения сельскохозяйственной техники / М. А. Белоцерковский, А. И. Камко, А. В. Чекулаев // Инновации в машиностроении : сб. науч. тр. Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 26–29 окт. 2010 г. / Объединенный ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: М.С.Высоцкий [и др.]. – Минск, 2010. – С. 296–299.

19. Белоцерковский, М. А. Эксплуатационные характеристики покрытий, полученных газопламенным распылением полимерных шнуров / М. А. Белоцерковский, А. В. Чекулаев // Белорусский промышленный форум – 2011 : Материалы межотраслевого науч.-практ. семинара «Сварка и родственные технологии». – Минск, 2011. – С. 179–180.

20. Белоцерковский, М. А. Характеристики покрытий, полученных распылением полимерных экструдатов / М. А. Белоцерковский, А. В. Чекулаев // Композиционные материалы и защитные покрытия : сб. материалов Междунар. науч.-техн. семинара, Минск, 27 ноябр. 2012 г./ Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: А.А.Дюжев [и др.]; под общ.ред. П.А. Витязя. – Минск : ОИМ НАН Беларуси, 2012. – С. 118–126.

21. Белоцерковский, М. А. Оптимизация процесса нанесения покрытий распылением полимерных шнуров / М. А. Белоцерковский, А. В. Чекулаев // Порошковая металлургия : инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка : сб. докл. Междунар. симп., Минск, 10–12 апр. 2013 г. : в 2 ч. / Нац. акад. наук Беларуси; редкол.: П.А.Витязь [и др.]. – Минск, 2013. – Ч. 2. – С. 219–224

Патенты

22. Устройство для газопламенного напыления проволочных материалов : пат. 2996 Респ. Беларусь, МПК В05В7/20 / М. А. Белоцерковский, А. В. Чекулаев, А. С. Прядко, В. М. Изойтко ; дата публ. 30.08.2006.

23. Способ газопламенного напыления покрытий : пат. 10711 Респ. Беларусь, МПК В05D1/08 / М. А. Белоцерковский, А. В. Чекулаев ; дата публ. 30.06.2008.

24. Способ газопламенного напыления полимерного покрытия : пат. 12620 Респ. Беларусь, МПК В05D1/08 / М. А. Белоцерковский, А. В. Чекулаев ; дата публ. 30.10.2009.

25. Устройство для газопламенного напыления проволочных материалов : пат. 7025 Респ. Беларусь, МПК В05В7/00 / М. А. Белоцерковский, А. В. Чекулаев ; дата публ. 28.02.2011.

26. Способ газопламенного напыления полимерных покрытий : пат. 13744 Респ. Беларусь, МПК В05D1/08/ М. А. Белоцерковский, А. В. Чекулаев ; дата публ. 2010.10.30.

РЭЗІЮМЭ

Чэжулаеў Андрэй Васільевіч

ТЭХНАЛОГІЯ ФАРМІРАВАННЯ АНТЫФРЫКЦЫЙНЫХ І КАРАЗІЙНАСТОЙКІХ ПАКРЫЦЦЯЎ ВЫСОКАХУТКАСНЫМ ГАЗАПОЛЫМНЫМ РАСПЫЛЕННЕМ ПАЛІМЕРНЫХ ШНУРОЎ

Ключавыя словы: газополымнае напыленне, палімерныя пакрыцці, высокахуткаснае распыленне шнуроў, адгезія, антыфрыкцыйныя характарыстыкі, каразійная ўстойлівасць.

Мэта даследаванняў: распрацоўка тэхналогіі нанясення антыфрыкцыйных і каразійнастойкіх пакрыццяў высокахуткасным газополымным распыленнем палімерных шнуроў на дэталі трыбаспалучэнняў тэхналагічнага абсталявання, сельскагаспадарчых і мабільных машын, і стварэнне тэхнічных сродкаў для яе рэалізацыі.

Метады даследавання і выкарыстаная апаратура: метады эксперыментальнага даследавання дынамічных і цеплафізічных параметраў газополымнага факела і струменя часціц распыленага палімернага шнура; стандартныя метадыкі ацэнкі фізіка-механічных уласцівасцяў напыленых пакрыццяў; метады аптычнага, рэнтгенаструктурнага аналізаў і ІЧ-спектраскапіі.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Распрацаваны фізічная і матэматычная мадэлі працэсу фарміравання пакрыццяў газополымным напыленнем палімернымі шнурамі і вызначаны неабходныя значэнні цеплафізічных і дынамічных параметраў распыляючага струменя. Разлічаны канструктыўныя параметры распыляльнай галоўкі прылады для напылення пакрыццяў палімернымі шнурамі, распрацавана канструкцыя прыстасавання і выраблены эксперыментальны ўзор. Даследаваны ўплыў рэжымаў газополымнага напылення на ўласцівасці пакрыццяў, што фарміруюцца, і вызначаны дыяпазон аптымальных тэхналагічных параметраў працэсу.

Рэкамендацыі па выкарыстанні. Вынікі даследавання могуць выкарыстоўвацца пры вытворчасці вузлоў сухога трэння мабільнай сельскагаспадарчай тэхнікі і тэхналагічнага абсталявання, для засцярогі ад карозіі тэхналагічных ёмістасцяў, закладных дэталей будаўніча-мантажных канструкцый; вынікі працы ўкаранены ў вытворчасць на ААТ «Гідрасельмаш».

Галіна прымянення: прамысловыя прадпрыемствы, што займаюцца пытаннямі вырабу, рамонту і засцярогі ад карозіі мабільнай тэхнікі і тэхналагічнага абсталявання.

РЕЗЮМЕ

Чекулаев Андрей Васильевич
ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ АНТИФРИКЦИОННЫХ
И КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ
ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ ГАЗОПЛАМЕННЫМ
РАСПЫЛЕНИЕМ ПОЛИМЕРНЫХ ШНУРОВ

Ключевые слова: газопламенное напыление, полимерные покрытия, высокоскоростное распыление шнуров, адгезия, антифрикционные характеристики, коррозионная стойкость.

Цель исследований: разработка технологии нанесения антифрикционных и коррозионностойких покрытий высокоскоростным газопламенным распылением полимерных шнуров на детали трибосопряжений технологического оборудования, сельскохозяйственных и мобильных машин, и создание технических средств для ее реализации.

Методы исследования и использованная аппаратура: методы экспериментального исследования динамических и теплофизических параметров газопламенного факела и струи частиц распыленного полимерного шнура; стандартные методики оценки физико-механических свойств напыленных покрытий; методы оптического, рентгеноструктурного анализов и ИК-спектроскопии.

Полученные результаты и их новизна: разработаны физическая и математическая модели процесса формирования покрытий газопламенным напылением полимерными шнурами и определены необходимые значения теплофизических и динамических параметров распыляющей струи. Выполнен расчет конструктивных параметров распылительной головки устройства для напыления покрытий полимерными шнурами, разработана конструкция устройства и изготовлен экспериментальный образец. Исследовано влияние режимов газопламенного напыления на свойства формируемых покрытий и определен диапазон оптимальных технологических параметров процесса.

Рекомендации по использованию: результаты исследования могут быть использованы при производстве узлов сухого трения мобильной сельскохозяйственной техники и технологического оборудования, для защиты от коррозии технологических емкостей, закладных деталей строительно-монтажных конструкций; результаты работы внедрены в производство на ОАО «Гидросельмаш».

Область применения: промышленные предприятия, занимающиеся вопросами изготовления, ремонта и защиты от коррозии мобильной техники и технологического оборудования.

SUMMARY

Chekulaev Andrey
TECHNOLOGY OF ANTIFRICTION AND
CORROSION RESISTANT COATINGS FORMATION
BY HIGH-VELOCITY FLAME SPRAY OF POLYMER CORDS

Keywords: flame spraying, polymer coatings, high-velocity spray of cords, adhesion, anti-friction characteristics, corrosion resistance.

Purpose of research: a technology development to deposit antifriction and corrosion resistant coatings by high-velocity flame spray of polymer cords onto of tribo-unit parts of technological, agricultural and mobile equipment, and creation of means for its implementation.

Research methods and equipment: methods of experimental research of dynamic and thermal parameters of the flame torch and the jet of sprayed particles of the polymer cord; standard techniques for assessing the physical and mechanical properties of the deposited coatings; optical methods, X-ray diffraction and IR spectroscopy.

The results obtained and their novelty: physical and mathematical models of the process of coatings formation by flame spray of polymer cords have been developed and the necessary thermal and dynamic parameters of the spray jet have been determined. The constructive parameters of the device spray head for coating deposition by polymer cords have been calculated, the device design has been developed and the operative embodiment has been produced. An effect of the flame spray deposition modes on the coating properties has been studied. The range of optimal technological parameters has been determined.

Recommendations for using: the results of the research could be used for production of dry friction units of mobile agricultural machinery and processing equipment, for corrosion protection of technological capacities, inserts for the building and assembling structures; the results have been introduced in production at the public corporation of "Gidroselmash".

Application: industrial enterprises dealing with production, repair and corrosion protection of mobile technical and processing equipment.

Научное издание

ЧЕКУЛАЕВ
Андрей Васильевич

**ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ АНТИФРИКЦИОННЫХ
И КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ
ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ ГАЗОПЛАМЕННЫМ
РАСПЫЛЕНИЕМ ПОЛИМЕРНЫХ ШНУРОВ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.02.07 – Технология и оборудование механической
и физико-технической обработки